

補助事業番号 2021M-148

補助事業名 2021年度 感電時の人体内電流経路の予測に向けた

大規模高速電流・電界解析技術の実現 補助事業

補助事業者名 国立大学法人宮崎大学 工学教育研究部 准教授 武居 周

1 研究の概要

感電時の人体内電流経路の予測に向けた大規模高速電流・電界解析技術の実現を目指し、高精度と高速性を両立する幾何マルチグリッド法に基づく人体内静電界解析に関する研究を行うものです。

2 研究の目的と背景

昨今の現代社会において、家電製品、送電線・変電所などの電力設備、ウェアラブル端末、電気自動車、ワイヤレス給電、5Gなど人体が電氣的・磁氣的な環境にさらされる機会は多くなってきており、これらによる人体の影響を明らかにするため、解剖学的数値人体モデル(以後数値人体モデル)を用いる「人体への電界・磁界曝露時」、「人体と電流の接触時」の数値解析による研究が数多く行われています。計算機の発達に伴い、数値解析で用いられる数値人体モデルも大規模化しています。国立研究開発法人情報通信研究機構 (National Institute of Information and Communications Technology: NICT) が開発・公開している数値人体モデルは、1辺2mmのボクセル、約800万個で構築されており、数多くの研究機関で用いられています。本数値人体モデルにおいて、皮膚や脂肪の境界など、本来は滑らかな曲面で表現されるべき異材境界は、階段状に近似されます。この異材境界の階段近似により、電界・磁界曝露、接触電流など解析の種類に関わらず、異材境界付近で電界強度が過大に評価されます。これは、現実の系に対して異材境界の階段近似では、階段の端点付近で電流の向きが急激に変化する特異点を持っていることに起因しています。当然ながら、実際の人体では、異材境界は滑らかな曲面であるため、このような電界強度の過大評価は生じません。

この問題を解決するための手法の1つとして、マーチングキューブ法を応用したメッシュスムージングがあります。本手法は、コンピュータグラフィックスで用いられるスムージング手法の一つで、主にボクセルデータをポリゴンデータに変換するときに使用されます。本研究では、数値人体モデルの1部に開発したスムージング手法を適用し、静電界解析を行い、幾何マルチグリッド法と一般的な前処理付きCG法 (ILU-CG) の間で比較を行いました。これら線形代数ソルバの比較から、非構造メッシュに特化した幾何マルチグリッド法を用いることで、細分化による計算時間の増加を抑えることができ、スムージング人体モデルにおいて、最大で、前処理付きCG法の1/15の計算時間で静電界解析を行うことができ、スムージングによる数値人体モデルの高精度化と高速化に寄与することが分かりました。

3 研究内容

<http://hamayu.emi.miyazaki-u.ac.jp/paper.html>

(1) 数値人体モデルの一部を用いた検証

ボクセルモデルに関しては、スムージングモデルと要素数を合わせるため、1段階細分化(64万要素)しているものを用います。ボクセルモデルで現れている階段近似に起因する電界強度がスムージングにより緩和されていることが分かり、このことから数値人体モデルにおける提案スムージング手法の有効性を示すことができました。また、ボクセルモデル、スムージングモデル共、反復回数はILU-CGが細分化ごとに約2倍増加しているのに対して、幾何マルチグリッド法は全く増加しませんでした。ボクセルモデルでの幾何マルチグリッド法について、反復回数は細分化ごとに減っているのに対して、スムージングモデルでの幾何マルチグリッド法は、ほとんど反復回数が変わりませんでした。一方、計算時間に対しては、幾何マルチグリッド法を用いることで、ボクセルモデルはILU-CGの計算時間の最大で約1/20、スムージングモデルは約1/15の時間で計算を実現しました。

次に、ボクセルモデルとスムージングモデルにおける幾何マルチグリッド法とILU-CG法の要素数(細分化レベル)ごとの計算時間の増加を調査したところ、ILU-CG法に比べ、幾何マルチグリッド法はモデルの規模(要素数)が増大しても、計算時間はほとんど増加しないことが分かり、大規模モデルにおける幾何マルチグリッド法の有効性を示すことができました。また、非構造メッシュにおいても幾何マルチグリッド法は有効であることを示すことができ、ボクセルモデルと同様に、モデルの規模が増大しても、計算時間がほとんど増加しないという幾何マルチグリッド法の特性を数値人体モデルで示すことができました。このスムージングを行った結果を図1に示します。

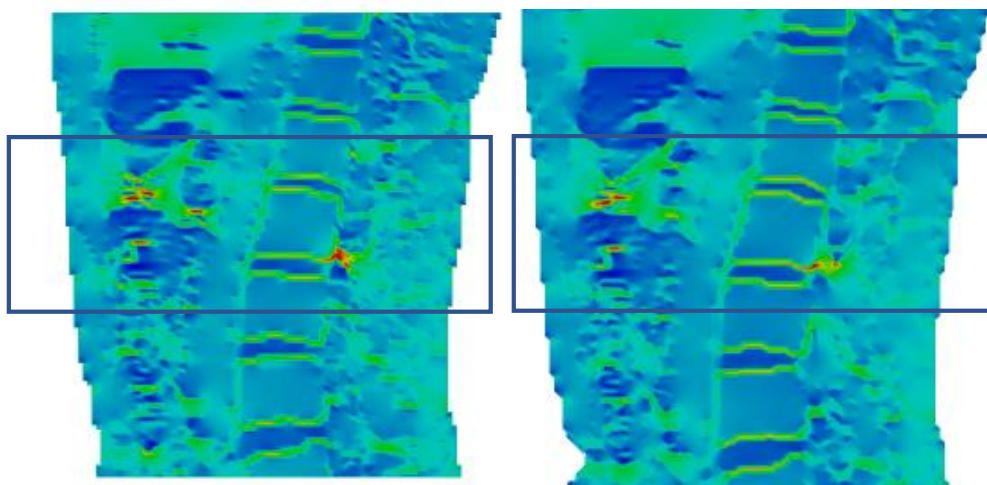


図1 胴体部分の電界強度可視結果

(左がボクセルモデル (スムージングなし)、右がスムージングありの解析結果)

(2) 数値人体モデルの全身を用いた実証

幾何マルチグリッド法とILUCG法を用いて、計算結果の比較を行いました。幾何マルチグリッド法の計算条件は基本的には、前節の通りですが、マルチグリッドの段数については、前節のモデルと比較し、規模が1段階大きくなるので、ボクセルモデルは2段、拡張マーチングキューブ法のモデルは1段としました。

ボクセルモデル、スムージングモデルにおいて、幾何マルチグリッド法を適用した際の収束履歴を確認したところ、ボクセルモデルの幾何マルチグリッド法では、反復回数1、500回以内に収束しないことが分かり、また収束履歴も反復回数10回あたりから残差が落ちなくなり、反復回数を増やしても収束する見込みがありませんでした。一方で、拡張マーチングキューブ法のモデルにおける幾何マルチグリッド法は、反復回数121回で収束しており、また収束履歴もボクセルモデルの幾何マルチグリッド法と比較して急峻でした(図2)。幾何マルチグリッド法においてスムージングが反復型行列解法における前処理のような役目を果たすことが分かり、ボクセルモデル問題では解けない幾何マルチグリッド法をスムージングにより解くことができることが分かりました。

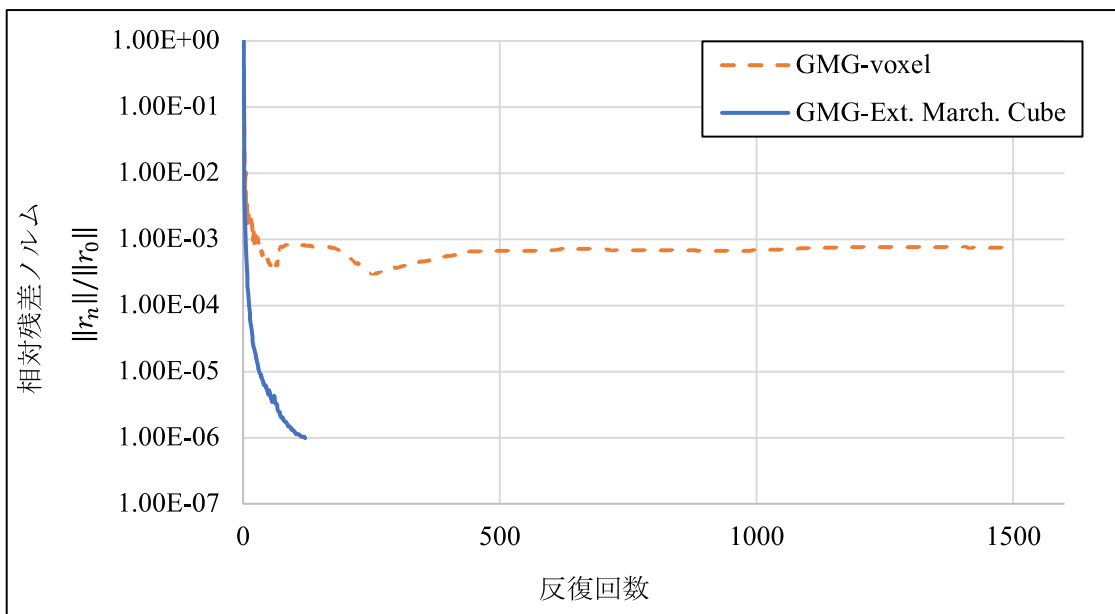


図2 幾何マルチグリッド法の残差ノルム収束履歴

(波線がボクセルモデル (スムージングなし)、実線がスムージングありの解析結果)

尚、本研究成果を含む論文一覧をURL: <http://www.save.sys.t.u-tokyo.ac.jp/~takei/paper.html> に記載しております。

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

本研究が完成されれば、間違いなく世界で初の高精度と高速性を両立する人体内電界解析例となります。また、高電圧による感電時の複雑な人体内の電界分布を明らかにすることができる。よって、電子機器設計・電気工事作業員などの防護服設計などを行うための、1つの設計材料として、本連成感電解析による数値結果例が使用され、実社会に大いに貢献できると考えています。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

代表者らは、長年、高周波電磁界解析手法の開発とその工学的利用技術の研究に携わってきました。高周波電磁界は電磁界の波動現象であり、近年、その技術移転により波動音響解析手法の研究を推進してまいりました。この度、数億要素規模の大規模解析が必要となり、それに向けたコード全体の改修ならびに数値モデルの高精度化手法により、大規模高精度の非定常音響解析の数値例を示すことができました。他方、代表者は現在、文部科学省 高性能汎用計算機高度利用事業費補助金・「富岳」成果創出加速プログラム|クリーンエネルギー「富岳」プロジェクト「スーパーシミュレーションと AI を連携活用した実機クリーンエネルギーシステムのデジタルツインの構築と活用」(代表: 東京大学 吉村忍教授)に分担者として参画しています。ここでは、スーパーコンピュータ「富岳」上で、本事業で扱った静電界解析の並列計算ソルバとなっている領域分解法アルゴリズムのチューニングを実施しており、並列解析コードのソルバ部分のHPC環境でのコード実用性を高めています。これにより、計算時間の削減検討が期待できます。また、今回開発しましたメッシュスムージング手法は、代表者が主宰する研究室に所属する大学院生および学部生の研究テーマの一部にもなっており、研究室での教育活動の一環として研究開発されたものでもあります。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

6-1. 査読付きジャーナル論文

1. 瀧澤哲, 工藤彰洋, 武居周
“移動音の移動方向知覚に関する研究 —適応法による検討—”
日本シミュレーション学会論文誌, Vol. 14, No. 2, pp.XX-XX, 2022. (採録決定)
2. Makoto Sakamoto, Kenji Sakoma, Taketo Kamasaka, Kodai Miyamoto, Amane Takei, Tsutomu Ito, Takao Ito
“A Fundamental Study on Control of CG Character using Brain Wave Discrimination”
Journal of Robotics, Networking and Artificial Life, Vol. 8, No.4, pp. 293–297. 2022.
3. A. Takei, H. Kawai, R. Shioya and T. Yamada
“High-frequency electromagnetic field analysis using pseudo-quadruple precision in subdomain local solver”
Journal of Advanced Simulation in Science and Engineering, Vol. 8, No. 2, pp.194-210, 2021.

4. Makoto Sakamoto, Amane Takei, Tsutomu Ito, Takao Ito
“Support by Aerial Video using 3DCG”
Journal of Advances in Artificial Life Robotics, Vol. 2, No. 3, pp.379-383, 2021.

6-2. 査読付き国際会議論文

1. A. Takei, S. Nakamura, K. Yodo and A. Miyoshi
“High-accuracy electromagnetic field simulation based on voxel mesh smoothing”
Proceedings of Compumag 2021, Cancun, Mexico, Jan. 16-20, 2022 USB.
2. M. Nomura, A. Takei
“Geometric Multi-Grid Method for Accurate and Fast Electrostatic Analysis with Unstructured Numerical Human Body Model”
Proceedings of Compumag 2021, Cancun, Mexico, Jan. 16-20, 2022 USB.
3. Sota Goto, Amane Takei, Shigeki Kaneko and Shinobu Yoshimura
“Heat Transfer Analysis with Uncertainty Using Non-Statistical Uncertainty Quantification Method and Parallelized Heat Transfer Analysis Tool”
Proceedings of The 40th JSST Annual Conference: International Conference on Simulation Technology, Kyoto, Japan, Sep. 1-3, 2021, USB.
4. Masamune Nomura and Amane Takei
“Accurate and Fast Electrostatic Field Analysis with Unstructured Numerical Human Body Model Using Parallel Geometric Multi-Grid Method”
Proceedings of The 40th JSST Annual Conference: International Conference on Simulation Technology, Kyoto, Japan, Sep. 1-3, 2021, USB.
5. Akihiro Kudo and Amane Takei
“Performance evaluation of wave-sound analysis code: ADVENTURE_Sound”
Proceedings of The 40th JSST Annual Conference: International Conference on Simulation Technology, Kyoto, Japan, Sep. 1-3, 2021, USB.
6. Shin-ichiro Sugimoto, Amane Takei and Masao Ogino
“Study on Parallel Coupled Analysis of High-Frequency Electromagnetic Field and Heat Conduction Problems of Numerical Human Body Model”
Proceedings of The 40th JSST Annual Conference: International Conference on Simulation Technology, Kyoto, Japan, Sep. 1-3, 2021, USB.
7. Amane Takei
“Development of Microwave analysis code: ADVENTURE_Fullwave”
Proceedings of The 40th JSST Annual Conference: International Conference on Simulation Technology, Kyoto, Japan, Sep. 1-3, 2021, USB.

6-3. 査読なし国際会議

1. A. Takei, K. Ohnaka, M. Sakamoto
“Development of parallel microwave analysis code: ADVENTURE_Fullwave”
Proc. of ICAROB2021, Jan. 21-24, 2022, Online, 2022, USB.
2. Kodai Miyamoto, Taketo Kamasaka, Makoto Sakamoto, Masahiro Yokomichi, Satoshi Ikeda, Amane Takei, Tsutomu Ito, Takao Ito
“Basic Study on the Use of XR Technology to Support Science Education”
Proc. of ICAROB2021, Jan. 21-24, 2022, Online, 2022, USB.

3. Taketo Kamasaka, Kodai Miyamoto, Makoto Sakamoto, Satoshi Ikeda, Amane Takei, Kenji Aoki, Tsutomu Ito, Takao Ito
“Basic Study on Design Tool of Hula Costumes”
Proc. of ICAROB2021, Jan. 21-24, 2022, Online, 2022, USB.

6-4. 査読なし国内会議

1. 大高智司, 武居周
“電気電子機器の環境安全評価の高精度化に向けた並列渦電流解析の検討”
2022 年電子情報通信学会 総合大会 ISS 特別企画「ジュニア&学生ポスターセッション」, 2022.
2. 岩城拓, 武居周
“低周波治療の高度化に向けた, 高精度人体内電流密度解析手法の基礎的検討”
2022 年電子情報通信学会 総合大会 ISS 特別企画「ジュニア&学生ポスターセッション」, 2022.
3. 野村龍希, 武居周
“超音波診断の事前予測の高度化に向けた, 高並列人体音響解析の基礎検討”
2022 年電子情報通信学会 総合大会 ISS 特別企画「ジュニア&学生ポスターセッション」, 2022.
4. 野村政宗, 武居周
“数値人体モデルのメッシュスムージングと 幾何マルチグリッド法による非構造静電界解析”
電子情報通信学会エレクトロニクスソサエティ, エレクトロニクスシミュレーション研究会, EST 研 R3 第 4 回, EST, 2022.
5. 武居周, 野村政宗
“メッシュスムージングによる人体内電界解析の高精度化”
第 30 回 MAGDA コンファレンス in 広島, 2021.
6. 武居周, 大中健登
“高周波電磁界解析コード: ADVENTURE_FullWave の開発”
日本機械学会, 第 34 回計算力学講演会 (CMD2021), 2021.
7. 野村政宗, 武居周
“非構造格子を用いた大規模静電界人体解析に対する幾何マルチグリッド法の適用”
日本機械学会, 第 34 回計算力学講演会 (CMD2021), 2021.
8. 杉本振一郎, 武居周, 荻野正雄
“数値人体モデルの電磁界-熱伝導連成解析に関する検討”
日本機械学会, 第 34 回計算力学講演会 (CMD2021), 2021.
9. 後藤聡太, 金子栄樹, 武居周, 吉村忍
“非統計学的な不確かさ定量化法と ADVENTURE_Thermal コードとの連携解析”
日本機械学会, 第 34 回計算力学講演会 (CMD2021), 2021.

10. 大中健登, 武居周
“高周波電磁界ソルバ：ADVENTURE_FullWaveの高速化開発”
第41回日本シミュレーション学会大会（JSST2021）学生セッション, 2021.
11. 西村聡汰, 武居周
“非定常高周波電磁界解析手法の開発と応用の検討”
第41回日本シミュレーション学会大会（JSST2021）学生セッション, 2021.
12. 吉留涼, 武居周
“波動音響解析ソルバ：ADVENTURE_Soundの開発と応用”
第41回日本シミュレーション学会大会（JSST2021）学生セッション, 2021.
13. 後藤聡太, 武居周, 金子栄樹, 吉村忍
“ADVENTURE_Thermalコードと非統計学的アプローチによる不確かさ定量化”
第26回計算工学講演会論文集, 2021.
14. 武居周, 野村政宗
“非構造幾何マルチグリッド法に基づく高精度人体内電界計算”
第26回計算工学講演会論文集, 2021.
15. 杉本振一郎, 武居周, 荻野正雄
“数値人体モデルの電磁界-熱伝導連成解析の検討”
第26回計算工学講演会論文集, 2021.
16. 野村政宗, 武居周
“マーチングキューブ法を応用したメッシュスムージングによる人体内高精度電界解析”
第33回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム（SEAD33）, 2021.

7 補助事業に係る成果物

(1) 補助事業により作成したもの

マーチングキューブ+ラプラシアンスムージングの2段階のメッシュスムージング手法

本開発は、Goethe University Frankfurt am MainのG-CSC(<https://gcsc.uni-frankfurt.de/>)との共同研究の一環により、有限要素解析フレームワーク：UG4(<https://gcsc.uni-frankfurt.de/simulation-and-modelling/ug4>)をベースとして進めています。

(2) (1)以外で当事業において作成したもの

特になし。

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名: 宮崎大学工学部(ミヤザキダイガクコウガクブ)

住 所: 〒889-2192

宮崎県宮崎市学園木花台西1-1

担 当 者: 准教授 武居周(タケイアマネ)

担 当 部 署: 工学科電気電子プログラム(コウガツカデンキデンシンプログラム)

E - m a i l: takei@cc.miyazaki-u.ac.jp

U R L: <http://hamayu.emi.miyazaki-u.ac.jp/index.html>

<http://www.save.sys.t.u-tokyo.ac.jp/~takei/index-j.html>